

01 P. 24480



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

Patentschrift

10 DE 196 15 694 C 1

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
H 01 L 41/083  
H 01 L 41/09  
H 01 L 41/22  
// H 01 L 41/187

B2

DE 196 15 694 C 1

21 Aktenzeichen: 196 15 694.7-35  
22 Anmeldetag: 19. 4. 96  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 3. 7. 97

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

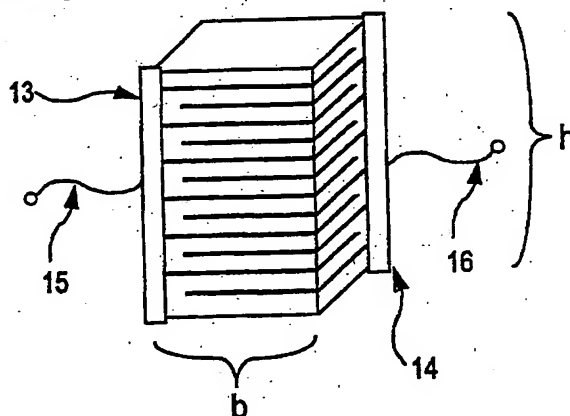
73 Patentinhaber:  
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:  
Cramer, Dieter, Dipl.-Ing. (FH), 83607 Holzkirchen,  
DE; Hellebrand, Hans, Dipl.-Phys., 81669 München,  
DE; Lubitz, Karl, Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., 85521  
Ottofurt, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:  
US 54 38 232  
US-Z.: Sensors and Actuators A, 43, 1994, S. 357-365;

54 Monolithischer Vielschicht-Piezoaktor und Verfahren zur Herstellung

57 Für einen monolithischen Piezoaktor in Vielschichtbauweise mit hohem Aspektverhältnis von mehr als zwei wird vorgeschlagen, den Aktor aus mehreren kleineren Stapeln in Vielschichtbauweise aufzubauen. Durch die gemeinsame Sinterung wird ein monolithischer Piezoaktor erhalten, der eine verbesserte mechanische Festigkeit bei guten piezoelektrischen Eigenschaften zeigt.



DE 196 15 694 C 1

## Beschreibung

Piezoaktoren bestehen üblicherweise aus mehreren in einem Stapel angeordneten Piezoelementen. Jedes dieser Elemente wiederum besteht aus einer Piezokeramikschi-  
 5 ckt, die beiderseits mit metallischen Elektroden versehen ist. Wird an diese Elektroden eine Spannung angelegt, so reagiert die Piezokeramikschi-  
 10 ckt mit einer Gitterverzerrung, die entlang einer Hauptachse zu einer nutzbaren Längenausdehnung führt. Da diese wiederum  
 weniger als zwei Promille der Schichtdicke entlang der Hauptachse beträgt, muß zur Erzielung einer ge-  
 wünschten absoluten Längenausdehnung eine entspre-  
 chend höhere Schichtdicke aktiver Piezokeramik be-  
 reitgestellt werden. Mit zunehmender Schichtdicke der  
 15 Piezokeramikschi-  
 ckt eines einzelnen Piezoelementes steigt jedoch auch die zum Ansprechen des Piezoele-  
 mentes erforderliche Spannung. Um diese in handhab-  
 baren Grenzen zu erhalten, liegen die Dicken von Pie-  
 20 zoeinzelementen üblicherweise zwischen 20 und  
 200 µm. Ein Piezoaktor in Mehrschichtbauweise muß  
 für eine gewünschte Längenausdehnung daher eine ent-  
 sprechende Anzahl an Einzelementen bzw. -schichten  
 aufweisen.

Bekannte Piezoaktoren in Vielschichtbauweise beste-  
 hen daher aus insgesamt zahlreichen Einzelschichten.  
 Zu deren Herstellung werden Piezokeramikgrünfolien  
 alternierend mit Elektrodenmaterial zu einem Stapel  
 angeordnet und gemeinsam zu einem monolithischen  
 Verbund laminiert und gesintert. Ein solches Verfahren  
 ist beispielsweise aus einem Artikel von S. Takahashi et  
 al in *Ferroelectrics*, 1983, Vol. 90. Seiten 181 bis 190,  
 bekannt. Größere Aktoren mit größerer absoluter Aus-  
 lenkung werden beispielsweise durch Verkleben mehrerer  
 solcher Stapel erhalten. Ein solches Verfahren ist  
 35 beispielsweise aus der US-A 54 38 232 bekannt. Solche  
 verklebte Stapel zeigen jedoch für viele Anwendungen  
 eine zu geringe Steifigkeit, insbesondere wenn mit dem  
 Piezoaktor hohe Kräfte übertragen werden müssen.  
 Ausreichend hohe Steifigkeiten besitzen nur Piezoaktoren  
 in voll monolithischer Vielschichtbauweise.

Nur diese zeigen einen ausreichend festen Verbund  
 der Einzelschichten im Stapel.

Beim Herstellen monolithischer Aktoren in Vielschichtbauweise treten mit zunehmender Höhe jedoch  
 40 zusätzliche Probleme auf. Die zu einem Stapel laminier-  
 ten Platten, die zahlreiche Einzelaktoren enthalten, müs-  
 sen vor dem Sintern zerteilt werden. Dabei werden die  
 Stapel der relativ großflächigen Grünfolien in kleinere  
 Stapel mit der gewünschten Aktorfläche zerteilt. Wäh-  
 rend niedrige Stapel in Automaten gestanzt werden  
 können, wie es beispielsweise bei Vielschichtkondensato-  
 45 ren in einfacher Weise möglich ist, muß dies bei höhe-  
 ren Stapeln durch einen Vielfach-Sägeprozeß entlang  
 der Trennlinien ersetzt werden.

Bei niedrigen Stapeln kann das Laminieren in Auto-  
 maten mit kurzen Taktzeiten erfolgen. Höhere Stapel  
 müssen mit erhöhter Sorgfalt laminiert werden, um ins-  
 besondere die vertikale Strukturgenauigkeit beim La-  
 minieren aufrechtzuerhalten. Dabei besteht stets die  
 Gefahr, daß durch den angewendeten Druck Querfließ-  
 prozesse in den Grünfolien zu einer Verschiebung ein-  
 50 zelner Schichten gegeneinander führen. Insbesondere in  
 den später zu kontaktierenden Zonen wird dadurch die  
 Kontaktgenauigkeit zerstört.

Die in der Vielschichttechnik verwendeten organi-  
 schen Binder sind in erster Linie auf die Erfordernisse  
 der Grünfolienherstellung und der Laminierung abge-

stimmt und müssen vor der Sinterung durch aufwendige  
 Entbinderung in Öfen bei kontrollierter Atmosphäre  
 entfernt werden. Mit zunehmender Stapelhöhe verviel-  
 5 fachen sich aber die Diffusionswege für den Binder bzw.  
 dessen Abbauprodukte bei der Entbinderung. Um eine  
 Zerstörung des Stapels durch einen zu hohen Innen-  
 druck des sich zersetzenden Binders zu verhindern, ist  
 ein hoher technischer Aufwand erforderlich, der wes-  
 sentlich über dem Aufwand bei der Herstellung von  
 Vielschichtkondensatoren liegt.

Wegen der vielen zu lösenden Probleme bei der Her-  
 stellung von Piezoaktoren in Vielschichtbauweise sind  
 bekannte monolithische Piezoaktoren in kostengünsti-  
 ger, bei Vielschichtkondensatoren üblicher Technik bis-  
 15 lang auf eine maximale Höhe von ca. 2,5 bis 5 mm be-  
 schränkt. Außerdem erreichen diese bekannten Piezo-  
 aktoren aus den genannten Gründen nur ein Aspektver-  
 hältnis (Höhe/Breite) von maximal ca. 2. Höhere Akto-  
 ren und Aktoren mit höherem Aspektverhältnis wurden  
 20 bislang durch Zusammenkleben mehrerer kleinerer Stapel  
 erhalten, wobei die Steifigkeit des Stapels und damit  
 dessen mechanische Belastbarkeit reduziert wird.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein  
 einfaches und sicheres Herstellungsverfahren für einen  
 25 Piezoaktor in monolithischer Vielschichtbauweise anzu-  
 geben, welcher ein hohes Aspektverhältnis von mehr als  
 2 besitzt, welcher sich monolithisch in Stapelhöhen von  
 mehr als 5 mm herstellen läßt, welcher optimale piezo-  
 elektrische Eigenschaften und eine hohe mechanische  
 30 Verbundfestigkeit besitzt.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einem Ver-  
 fahren nach Anspruch 1 gelöst. Bevorzugte Ausgestal-  
 tungen der Erfindung sind weiteren Ansprüchen zu ent-  
 nehmen.

Grundlegende Idee der Erfindung ist es, das Laminie-  
 ren bei begrenzter Stapelhöhe im Nutzen durchzuführen.  
 Nach dem Vereinzeln der Lamine, also dem Auf-  
 trennen der großflächigen laminierten ersten Stapel (=  
 erste Verbünde) in kleinere zweite Stapel (= zweite  
 40 Verbünde) der gewünschten Aktorgrundfläche erfolgt  
 das Entbindern. Mehrere dieser zweiten Verbünde wer-  
 den nun auf eine Höhe gestapelt, die ein Vielfaches des  
 ersten Nutzens beträgt, und unter leichtem Druck zum  
 erfindungsgemäßen Piezoaktor gesintert. Dabei lassen  
 sich erfindungsgemäße Piezoaktoren mit einer Gesamt-  
 45 höhe von mehr als 5 mm und einem Aspektverhältnis  
 von mehr als 2 erhalten. Durch das Laminieren der er-  
 sten Stapel bei relativ geringer Nutzengröße und damit  
 relativ geringer Stapelhöhe läßt sich eine hohe Vertikal-  
 50 genauigkeit der inneren Elektrodenstrukturen einhal-  
 ten. Dies ist besonders wichtig, da die Elektroden struk-  
 turiert auf die Grünfolien aufgedruckt werden, so daß in  
 den Elektrodenschichten Ausnehmungen verbleiben,  
 deren exakte Positionierung im Stapel für eine korrekte  
 55 Kontaktierung besonders wichtig ist. Diese hohe Vertikal-  
 genauigkeit innerhalb eines Verbundes kann beim  
 Übereinanderstapeln mehrerer dieser Verbünde und  
 dem anschließenden gemeinsamen Sintern in einfacher  
 Weise beibehalten werden. Geringfügige Versetzungen,  
 60 die beim Übereinanderstapeln der Verbünde entstehen  
 können, sind dabei ohne Belang. Das Zerteilen der er-  
 sten Verbünde mit begrenzter Stapelhöhe kann in be-  
 kannter kostengünstiger Weise durch Schneiden, Stan-  
 zen oder Scheren durchgeführt werden. Das Entbindern  
 65 der gegebenenfalls vereinzelter Verbünde erfolgt in ge-  
 ringer Stapelhöhe von beispielsweise bis zu 2 mm Höhe.  
 So sind für den Binder bzw. dessen Zersetzungsproduk-  
 te maximale Diffusionswege von ca. 1 mm zu überwin-

den. Daher kann zur Entbinderung ein herkömmliches Verfahren ohne zusätzliche aufwendige Verfahrenskontrolle eingesetzt werden.

Die Herstellung erster Verbünde mit im Verbund einheitlichen Elektrodenstrukturen ermöglicht es in einfacher Weise, durch Kombination mehrerer Verbünde mit unterschiedlicher Elektrodenstruktur einen Piezoaktor mit unterschiedlichen Schichtbereichen herzustellen. Die Schichtbereiche können sich dabei durch die genaue Elektrodenstruktur, die Schichtdicken der Einzelschichten oder die elektrische Kontaktierung unterscheiden. So ist es in einfacher Weise möglich, im Piezoaktor mechanisch gekoppelte, aber elektrisch entkoppelte Aktor- und Sensorfunktionen nebeneinander zu realisieren. Auch die Herstellung der Endbereiche, also der Kopf- und Fußbereiche der Piezoaktoren wird so vereinfacht. Diese bestehen aus größeren Bereichen elektrisch inaktiver Keramikschichten, die mit oder ohne dazwischenliegende Elektrodenstruktur realisiert werden können.

Der erfindungsgemäße Piezoaktor und dessen Aufbauverfahren ist dabei völlig unabhängig von den verwendeten Materialien. Für den Aktor kann eine beliebige PZT-(Bleizirkonattitanat) Keramik eingesetzt werden. Zur Herstellung der Elektroden-schichten können verschiedene metallhaltige Pasten verwendet werden. Eine Platinpartikel enthaltende Paste ermöglicht beispielsweise eine Sinterung bei der hohen optimalen Temperatur, die für ein gutes Keramikgefüge und damit für gute piezoelektrische Eigenschaften erforderlich ist. Für geringere Sintertemperaturen sind auch Palladium/Silber-haltige Pasten geeignet.

Im folgenden wird das Verfahren anhand eines Ausführungsbeispiels und der dazugehörigen acht Figuren näher erläutert.

Fig. 1 zeigt eine mit Elektrodenmaterial bedruckte Grünfolie in der Draufsicht.

Fig. 2 zeigt einen Stapel von bedruckten Grünfolien im schematischen Querschnitt.

Fig. 3 zeigt diesen Stapel nach dem Laminieren in perspektivischer Ansicht (= erster Verbund).

Fig. 4 bis 6 zeigen verschieden aufgebaute Verbünde, die unterschiedlichen Bereichen im späteren Piezoaktor entsprechen. Dargestellt ist jeweils ein Schnitt entlang der Diagonale A—B von Fig. 3.

Fig. 7 zeigt die Anordnung verschiedener Verbünde in einer Matrice und

Fig. 8 zeigt einen mit elektrischen Anschlüssen versehenen fertigen Piezoaktor.

### 1. Herstellung eines Piezoaktors

Die möglichst homogen gemischten Ausgangsmaterialien können nach bekannten Verfahren hergestellt werden und beispielsweise nach dem Mixed-Oxide-Verfahren oder auf chemischen Routen dargestellt werden, beispielsweise nach dem Sol-Gel-Verfahren, dem Citrat-Verfahren, dem Oxalat-Verfahren oder über sonstige metallorganische Vorläuferverbindungen. Während für das Mixed-Oxide-Verfahren sämtliche für die Keramik vorgesehenen Kationen in Form ihrer Oxide miteinander vermischt und anschließend in PZT überführt werden, gehen andere Herstellungsverfahren von gemischten Lösungen metallorganischer Verbindungen der gewünschten Kationen aus. Durch Fällung aus Lösung oder durch allmähliches Eindicken im sogenannten Sol-Gel-Verfahren wird eine äußerst homogene Verteilung der Kationen im späteren Feststoff erzielt. Es wird

beispielsweise eine Keramikpulver der nominalen Zusammensetzung  $Pb_{0.97}Nd_{0.02}(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3$  erhalten.

Nach der Calzinierung wird erneut gemahlen und homogenisiert. Anschließend wird mit einem organischen Binder und Wasser vermischt und so ein Schlicker hergestellt. Damit werden anschließend Grünfolien gezogen oder gegossen, die nach dem Trocknen eine Dicke von zum Beispiel 20 bis 200  $\mu m$  aufweisen.

Nach Trocknen der Grünfolien werden diese mit Elektrodenmaterial versehen, beispielsweise mit einer Paste bedruckt, die Partikel einer Silber/Palladium-Legierung (70/30 Masseverhältnis) in einem Binder bei insgesamt druckbarer Konsistenz enthält. Möglich ist es jedoch auch, Pasten mit Partikeln anderer leitfähiger Metalle wie z. B. Platin zu verwenden.

Auf der Grundfläche einer Grünfolie können dabei Elektrodenstrukturen für mehrere Piezoelemente in einem Schritt aufgedruckt werden. Vorzugsweise wird dabei zur späteren Kontaktierung für jedes einzelne Piezoelement zumindest eine Aussparung in der Elektrodenstruktur vorgesehen.

Fig. 1 zeigt eine mit Elektrodenmaterial bedruckte Grünfolie in der Draufsicht. Das Bedrucken erfolgt gemäß einem Muster, welches bedruckte Bereiche 1 und unbedruckte freigebliebene Bereiche 2 umfaßt. Die Schnittlinien SL deuten dabei die spätere Aufteilung der großflächigen Grünfolien in kleinere Verbünde mit der gewünschten Aktorfläche an. In der Figur ist eine Grünfolie mit einem Raster von  $3 \times 3$  kleineren Verbünden dargestellt. Entsprechend der gewünschten Grundfläche für den späteren Piezoaktor ist auch ein beliebiges anderes Raster und/oder ein anderes Elektrodenmuster 1, 2 denkbar. Das durch die Schnittlinien in der Fig. 1 angedeutete quadratische Raster hat beispielsweise eine Kantenlänge von 14 mm.

Für die Elektroden-schicht wird einseitig soviel Elektrodenmaterial aufgedruckt, daß sich nach der Sinterung eine ca. 2 bis 3  $\mu m$  dicke zusammenhängende Elektroden-schicht ergibt.

Fig. 2 Die mit Elektrodenmaterial bedruckten Piezokeramik-Grünfolien S1, S2, S3 ... werden gegebenenfalls getrocknet und anschließend übereinander gestapelt, wobei sich eine alternierende Anordnung von Piezokeramikschichten 3 und Elektroden-schichten 5 ergibt. Bei den Elektroden-schichten wird ebenfalls alternierend so gestapelt, daß über jeder der genannten Aussparungen 4, die den unbedruckten Bereichen 2 von Fig. 1 entsprechen, in einer ersten Elektroden-schicht eine mit Elektrodenmaterial bedruckte Fläche 1 in der nächsten benachbarten Elektroden-schicht angeordnet ist. Dies wird bei einem wie in Fig. 1 dargestellten Elektrodenmuster durch eine  $180^\circ$  Drehung der Folie um eine senkrecht zur Folie stehende Achse erreicht. In der Fig. 2 ist die alternierende Anordnung der mit Elektrodenmaterial 5 bedruckten Grünfolien 3 im Stapel schematisch angedeutet. Durch die alternierende Anordnung ist jede zweite Schicht deckungsgleich bezüglich ihres Elektrodenmusters. In den dazwischenliegenden Ebenen sind die Ausnehmungen 4 versetzt.

Auf diese Weise werden Stapel aus so vielen übereinandergelegten Einzelschichten gebildet, daß eine Gesamthöhe von typisch 2 bis 3 mm nicht überschritten wird. Bei einer Grünfoliendicke von beispielsweise 100  $\mu m$  entspricht dies etwa 30 Einzelschichten.

Auf die lose gestapelten Einzelschichten wird nun ein Stempel aufgesetzt, mit dem der Stapel unter einem einachsigen Druck von ca. 100 MPa quasi-isostatisch

verdichtet wird. Bereits bei Raumtemperatur, bevorzugt aber unter leicht erhöhter Temperatur und unter atmosphärischen Bedingungen führt die Fließfähigkeit des Binders zu einer Erhöhung der Keramikdichte von 48 auf 60 Prozent der theoretischen Keramikdichte. Dabei erfolgt ein interner Druck- und Volumenausgleich, wobei beispielsweise die Ausnehmungen 4 im Elektrodennmuster vollständig von Keramikmaterial ausgefüllt werden. Auf diese Weise gleichen sich während des Laminierens auch Dichte- und Druckgradienten innerhalb des Stapels bzw. des fertigen Verbunds aus.

Fig. 3 zeigt einen so hergestellten Verbund in perspektivischer Darstellung. Die ursprünglichen Ausnehmungen 4 sind nun vollständig mit Keramikmaterial 3 ausgefüllt. Der feste Verbund aus den laminierten Einzelschichten weist noch ausreichend Plastizität auf, so daß er nun in diesem Stadium gemäß dem durch die Schnittlinien vorgegebenen Raster in die entsprechenden Anzahl kleinerer Verbünde mit der gewünschten Grundfläche verteilt werden kann. Dies kann durch Schneiden oder Stanzen in einem hochautomatisierten Prozeß erfolgen. Anhand von (nicht dargestellten) zusätzlich aufgedruckten Schnittmarken kann die Vereinzelung des Verbundes durch ein Videoverfahren beobachtet und mit einem Rechner überwacht werden.

Im nächsten Schritt werden die so vereinzelt laminierten Stapel (Verbünde) vom Binder befreit. Dies erfolgt in einem thermischen Schritt, wobei eine langsam bis auf ca. 500°C steigende Temperatur und ein parallel dazu ansteigender Sauerstoffpartialdruck gewährleistet, daß der organische Binder ausdiffundiert und sich nicht schlagartig zersetzt und dabei die keramische Struktur zerstört. Die Bedingungen werden also so eingestellt, daß erst in einem späteren Abschnitt des Verfahrens eine Oxidation des Binders bzw. dessen durch thermische Zersetzungen entstandener Fragmente erfolgt. Die geringe Stapelhöhe der Verbünde von beispielsweise 3 mm gewährleistet dabei kurze Diffusionswege für die Zersetzungs- und/oder Oxidationsprodukte des Binders. Im Ausführungsbeispiel ist die Entbinderung bei bis 500°C ansteigender Temperatur in einer maximal 8 Volumen-Prozent Sauerstoff enthaltenden Atmosphäre innerhalb von 24 Stunden abgeschlossen. Bei der Entbinderung werden keine Dimensionsänderungen und daher kein Verziehen im Stapel beobachtet. Die vertikale Strukturgenauigkeit im Verbund bleibt so erhalten.

Der erfindungsgemäße Piezoaktor kann aus mehreren unterschiedlichen Verbünden aufgebaut werden. Im einfachsten Fall (siehe dazu auch die Fig. 4 bis 6) besteht der Piezoaktor aus zumindest einem Mittelteil MT, der die bereits beschriebene, regelmäßige, alternierende Elektrodenstruktur aufweist. Am oberen Ende des Stapels wird ein Kopfteil KT vorgesehen. Dieses umfaßt eine Kopfplatte 6, die entweder keine aktive, das heißt elektrisch angeschlossene Elektroden-schicht oder gar keine Elektroden-schicht enthält. Eine allein aus Keramikfolien aufgebaute Kopfplatte 6 kann zur besseren Kraftübertragung des Piezoaktors dienen. Einen entsprechenden Aufbau besitzt auch das Fußteil FT, dessen Fußplatte 7 wie die Kopfplatte 6 des Kopfteils KT aufgebaut sein kann.

Zur Minimierung des Materialeinsatzes ist es dabei möglich, das Muster für die aufgedruckten Elektroden-schichten zu variieren und einen kompletten Piezoaktor einschließlich Kopf- und Fußteil und einer entsprechenden Anzahl von Mittelteilen aus einem einzigen laminierten Stapel herzustellen. Die Anzahl der gleich oder

unterschiedlich aufgebauten Mittelteile richtet sich dabei nach der Höhe der gewünschten Auslenkung des fertigen Piezoaktors, die wiederum Höhe des Piezoaktors bestimmt.

Fig. 7 zeigt, wie die entbünderten Kopf-, Mittel- und Fußteile in einer passgenauen Matrice 9 bis zur gewünschten Höhe gestapelt und mit einem Stempel 10 beschwert werden. Die Sinterung erfolgt dann unter leichtem Druck von 10 bis 100 kPa in einer oxidierenden Atmosphäre. Die beispielsweise runde Preßmatrize entspricht in ihrem Durchmesser dem Stanzmaß der übereinander gestapelten Verbünde. Matrize und Stempel sind vorzugsweise wiederverwendbar und bestehen aus Materialien, die während der Sinterung mit der Keramik keine Reaktionen eingehen. Gut geeignet sind beispielsweise Matrizen aus Aluminium- oder Magnesiumoxid. Der Druck kann in einfacher Weise mit einem auf den Stempel aufgelegten Zusatzgewicht erzeugt werden. Auch für das Material dieses Zusatzgewichtes gilt, daß es bei 1130°C in oxidierender Atmosphäre stabil ist und seinerseits die Sinteratmosphäre nicht schädlich beeinflusst.

Auch zur Sinterung wird wieder ein Temperaturprogramm bis zum Erreichen der maximalen Sinter-temperatur gefahren. Dies kann in einem einzelnen Ofen mit Temperaturkontrolle oder in einem Durchlauf-Ofen mit entsprechend unterschiedlich temperierten Zonen erfolgen. Im Ausführungsbeispiel ist die Sinterung nach ca. 24 Stunden bei 1130°C abgeschlossen.

Im Ergebnis wird ein monolithischer Piezoaktor erhalten, der eine optimal ausgeprägte Keramikstruktur, aufgrund der hohen Sinter-temperatur gute piezoelektrische Eigenschaften und eine hohe Verbundfestigkeit zwischen den Keramik- und den Elektroden-schichten aufweist. Dementsprechend besitzt der monolithische Piezoaktor auch eine hohe Steifigkeit, mit der die Übertragung hoher Kräfte möglich ist.

Fig. 8 zeigt einen fertigen Piezoaktor, der zur elektrischen Kontaktierung an einander gegenüberliegenden Ecken streifenförmig mit Elektrodenmaterial kontaktiert ist. Aufgrund der von Einzelschicht zu Einzelschicht alternierenden Elektrodenstruktur erreicht ein solcher Kontakt 13 nur jeweils jede zweite Elektroden-schicht, während der an der gegenüberliegenden Kante befestigte Kontakt 14 die jeweils dazwischenliegenden Elektroden-schichten kontaktiert. So ist eine elektrisch parallele Verschaltung der (zwischen den Elektroden-schichten liegenden) piezoelektrischen Schichten möglich, die einen optimalen Betrieb des Piezoaktors ermöglichen.

Das aus dem Verhältnis Höhe  $h$  zur Kantenlänge  $b$  ermittelte Aspektverhältnis kann beim erfindungsgemäßen Piezoaktor einen Wert bis ca. 5 annehmen. Prinzipiell lassen sich auch noch höhere und schlankere Piezoaktoren herstellen, doch ist dies mit einer erhöhten Ausfallrate beim Sintern verbunden. Die Matrize ist von ihren Innenabmessungen an das Stanzmaß bzw. das Maß der entbünderten Verbünde angepaßt. Da jedoch beim Sintern ein linearer Schwund in allen drei Raumachsen von ca. 15 Prozent beobachtet wird, kann die Matrize den Stapel beim Sintern nur anfänglich stützen. Im weiteren Fortschritt des Sinterverfahrens kann es daher bei zu hohen bzw. zu schlanken Piezoaktoren zu einem Abknicken des Stapels kommen.

Besonders vorteilhaft ist beim erfindungsgemäßen Piezoaktor zu erwähnen, daß die vertikale Strukturgenauigkeit der Elektroden im Bereich der Kontaktkanten unabhängig vom Aspektverhältnis ist. Aufgrund von

Toleranzen und geringfügigen Abweichungen beim Stanzen und Stapeln können bei zwei aufeinanderfolgenden Mittelteilen zwar geringe und für das Verfahren charakteristische Versetzungen der Elektrodenstrukturen auftreten, die jedoch für die Sicherheit der Kontaktierung ohne Belang sind.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Piezoaktors in 10  
monolithischer Vielschichtbauweise,  
— bei dem einen Binder enthaltende Piezokeramikgrünfolien (5) einer Dicke von 20 bis 200  $\mu\text{m}$  einseitig mit Schichten aus Elektrodenmaterial (3) bedruckt werden 15  
— bei dem die bedruckten Piezokeramikgrünfolien zu ersten Stapeln von maximal 3 mm Höhe lose so übereinander geschichtet werden, daß sich im Stapel eine alternierende Reihenfolge von Piezokeramikgrünfolien und 20 Elektrodenmaterial ergibt  
— bei dem die ersten Stapel unter einachsigen Verpressen zu einem ersten Verbund laminiert werden  
— bei dem der erste Verbund bei erhöhter 25 Temperatur vom Binder befreit wird  
— bei dem mehrere dieser entbinderten Verbünde (FT, MT, KT) zu einer Gesamthöhe von mehr als 5 mm übereinander gestapelt und unter einachsigen Druck gesintert werden, wobei ein Piezoaktor mit der gewünschten Anzahl an Einzelschichten erhalten wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,  
— bei dem Piezokeramikgrünfolien mit einem n-fachen der gewünschten Grundfläche vorgesehen und bedruckt werden und 35  
— bei dem der laminierte erste Verbund vor dem Entbindern durch Schneiden oder Stanzen in n Verbünde der gewünschten Grundfläche zerteilt wird. 40
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem das Übereinanderstapeln und Sintern unter Druck in einer Matrize (9) erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die Piezokeramikgrünfolien PZT umfassen 45 und bei dem das Sintern in einer oxidierenden Atmosphäre erfolgt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem das Sintern unter konstantem Druck von 10 bis 100 kPa erfolgt. 50
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem der Piezoaktor aus unterschiedlichen Verbünden aufgebaut wird, die zumindest ein Kopf- (KT), ein Mittel- (MT) und ein Fußteil (FT) umfassen.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem der Piezoaktor aus mehreren Verbünden mit 55 in sich einheitlicher, aber von Verbund zu Verbund unterschiedlicher Elektrodenstruktur aufgebaut wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, 60  
— bei dem auf die Grünfolien Elektroden-schichten aus einer Silber- und Palladium-haltigen Paste aufgebracht werden  
— bei dem die Sinterung bei einer maximalen Temperatur von 1130°C in oxidierender At- 65 mosphäre durchgeführt wird.
9. Piezoaktor, hergestellt nach einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, in monolithi-

scher Vielschichtbauweise,

- umfassend einen Stapel von zusammen (gemeinsam) gesinterten, alternierend angeordneten Piezokeramik- (5) und Elektrodenmaterialschiichten (3)
- mit einer Gesamthöhe (h) von mehr als 5 mm
- mit einem Aspektverhältnis Höhe zu Durchmesser (bzw. Kantenlänge) des Stapels von mehr als 2 und
- mit mehreren über die Stapelhöhe unterschiedlichen Bereichen, innerhalb derer Piezokeramik- und Elektrodenmaterialschiichten jeweils gleiche Stapelstruktur aufweisen, wobei die Bereiche gegeneinander versetzt sind.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

FIG 1

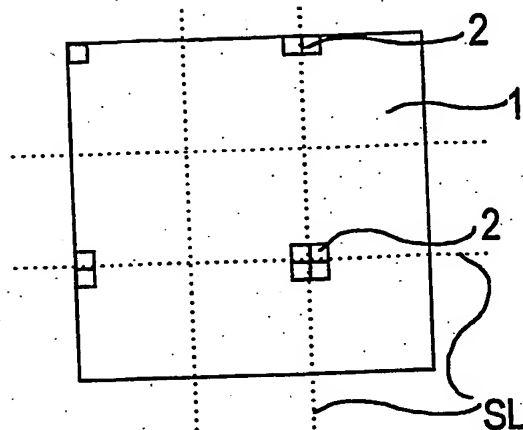


FIG 2

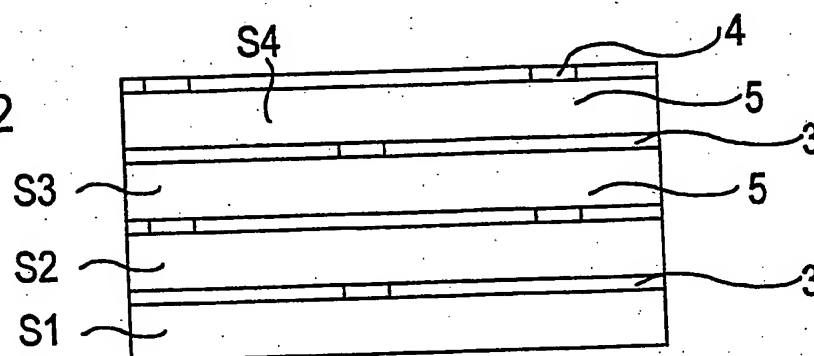


FIG 3

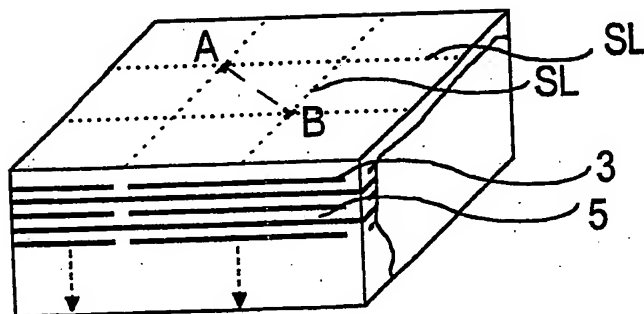


FIG 7

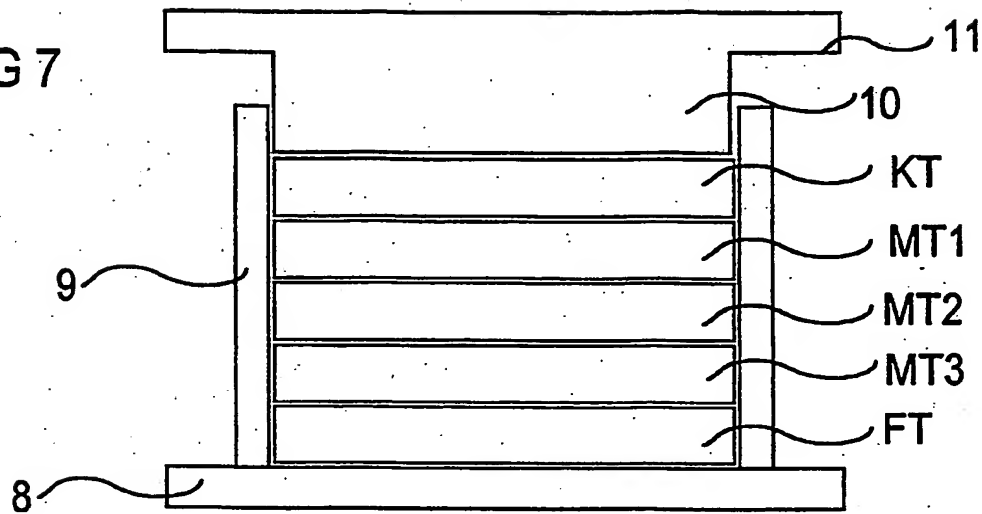


FIG 8

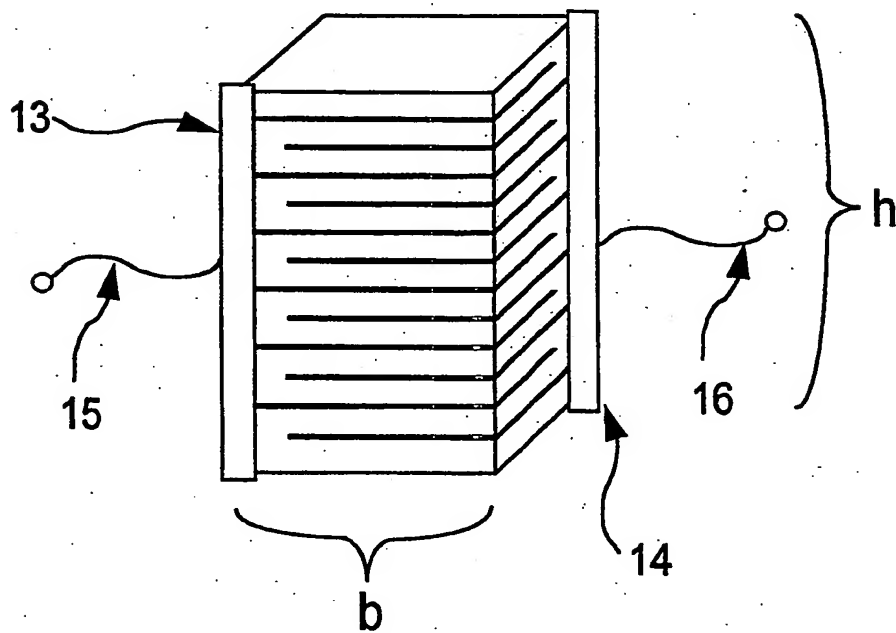


FIG 4

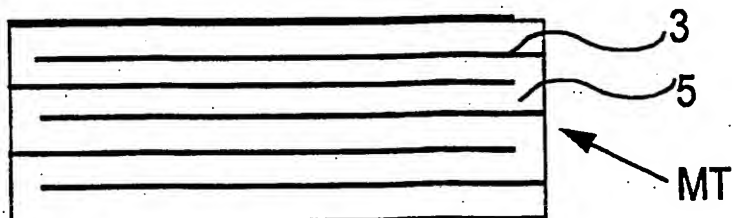


FIG 5

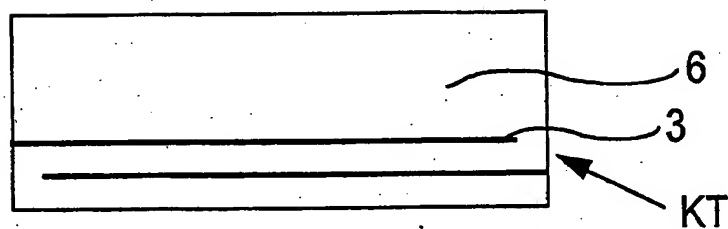


FIG 6

